

## Potencial do biometano como combustível na América do Sul: estimativa numérica da redução nas emissões veiculares

Luís Pedro Vieira Vidigal<sup>1</sup>, Vítor Brumano Andrade Cardinali<sup>2</sup>, Túlio Augusto Zucareli de Souza<sup>3</sup>, Luis Filipe de Almeida Roque<sup>4</sup>, Roberto Berlini Rodrigues da Costa<sup>5</sup>, Davi José Souza Ferreira<sup>6</sup>, Paulo Henrique Melo Santos<sup>7</sup>, Nelly Vanessa Pérez Rangel<sup>8</sup>, Gustavo Vieira Frez<sup>9</sup>, Gabriel Marques Pinto<sup>10</sup>, Christian Jeremi Coronado Rodriguez<sup>11</sup>

GETEC, Instituto de Engenharia Mecânica (IEM), Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI, Brasil. <sup>1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11</sup>

luis.vidigal@engenharia.ufjf.br<sup>1</sup>, vitorcardinali@unifei.edu.br<sup>2</sup>, tulio\_zucareli@unifei.edu.br<sup>3</sup>, filipe\_roque@unifei.edu.br<sup>4</sup>, robertoberlini@unifei.edu.br<sup>5</sup>, davijosouzaf@gmail.com<sup>6</sup>, paulohsantos@unifei.edu.br<sup>7</sup>, d2021100182@unifei.edu.br<sup>8</sup>, gustavo.frez@cefet-rj.br<sup>9</sup>, gabrielmarquespinto@unifei.edu.br<sup>10</sup>, christian@unifei.edu.br<sup>11</sup>

### Resumo

O biometano é um combustível renovável promissor para utilização em veículos leves e de passeio. Através da reação de combustão completa em condições estequiométricas, é possível identificar o potencial de redução nas emissões de dióxido de carbono em até 15,06% ao substituir o gás natural por biometano. Cinco cenários foram avaliados, nos quais 1%, 5%, 10%, 15% e 20% da frota veicular de veículos leves e de passeio alimentados com gás natural seriam substituídos por biometano. Para 1% de substituição é possível reduzir 9.230 ton<sub>CO2</sub>/ano. Para 20% de substituição seriam reduzidos 184.593 ton<sub>CO2</sub>/ano. A produção atual de biometano nos países avaliados aponta que no Chile seria possível a substituição de 15%, reduzindo em 390,93 ton<sub>CO2</sub>/ano, enquanto o Brasil, com 20% de substituição, reduziria as emissões em 13.244 ton<sub>CO2</sub>/ano.

**Palavras-chave:** biometano; motores de combustão interna; emissões; América do Sul.

### Abstract

Biomethane is a promising renewable fuel for use in light and passenger vehicles. Through complete combustion reaction under stoichiometric conditions, it is possible to identify a potential reduction in carbon dioxide emissions by up to 15.06% when replacing natural gas with biomethane. Five scenarios were evaluated, in which 1%, 5%, 10%, 15%, and 20% of the light and passenger vehicle fleet powered by natural gas would be replaced by biomethane. For a 1% substitution, it is possible to reduce emissions by 9,230 ton<sub>CO2</sub>/year. For a 20% substitution, emissions would be reduced by 184,593 ton<sub>CO2</sub>/year. The current biomethane production in the evaluated countries indicates that in Chile, a 15% substitution would reduce emissions by 390.93 ton<sub>CO2</sub>/year, while in Brazil, a 20% substitution would reduce emissions by 13,244 ton<sub>CO2</sub>/year.

**Keywords:** biomethane; internal combustion engines; emissions; South America.

### 1. Introdução

Novos combustíveis e métodos que reduzam as emissões de poluentes no setor de transporte ganham cada vez mais atenção de pesquisadores no mundo todo. O aumento da frota de veículos a cada ano aliado com o uso de combustíveis fósseis contribuem para o aumento dos níveis de poluição atmosférica. Dentre os principais poluentes emitidos por motores de combustão interna, o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) alcançou em 2019 sua maior concentração na atmosfera, atingindo a marca de 410 ppm [1]. Legislações cada vez mais restritivas vem sendo

implementadas ao redor do mundo, onde visam reduzir as emissões dos motores de combustão interna e consequentemente promover um aumento na eficiência e reduzir o consumo de combustível [1]. Os países participantes da XXI Conferência de Paris (COP21) traçaram metas para reduzir continuamente as emissões de CO<sub>2</sub> no setor de transportes [2]. Tendo em vista a crescente restrição nas emissões no setor de transportes, veículos elétricos se tornam uma alternativa em substituição aos motores de combustão interna, entretanto, os motores de combustão interna continuarão a importantes nos próximos anos, sobretudo no transporte pesado.

Uma das formas de reduzir as emissões a curto e médio prazo é através da substituição dos tradicionais combustíveis fósseis (gasolina e diesel) por combustíveis com baixo teor de carbono, combustíveis oxigenados ou combustíveis livres de carbono. Em um cenário de transição energética rápida, o gás natural é um combustível com características interessantes, pois possui menor relação carbono/hidrogênio que os combustíveis tradicionais [3], o que pode promover uma redução nas emissões de CO<sub>2</sub> em motores de combustão interna de até 20% [4]. O gás natural pode ser utilizado como combustível em motores de ignição por centelha à gasolina, a partir de adaptações no sistema de injeção de forma a utilizarem o gás natural ou o combustível original do motor.

Desta forma, o biometano surge como uma alternativa renovável ao gás natural, visto que sua composição possui como principal componente o metano (CH<sub>4</sub>), que também é o principal hidrocarboneto presente no gás natural. O biometano é produzido a partir da purificação do biogás, conhecida como *upgrading* do biogás. Produzido a partir da decomposição anaeróbica de matéria orgânica, o biogás é caracterizado por ser uma mistura de gases, onde o CH<sub>4</sub> (60% em volume) e o CO<sub>2</sub> (40% em volume) são os principais componentes. Ainda é possível encontrar outros componentes no biogás, como ácido sulfídrico, nitrogênio e oxigênio, mas em pequenas proporções. Desta forma, para que o biometano seja produzido, é necessário remover do biogás o ácido sulfídrico, bem como reduzir a concentração de CO<sub>2</sub> de forma que a concentração volumétrica do CH<sub>4</sub> alcance valores superiores a 92%. Os maiores produtores de biometano são a China (21%), Alemanha (20%), Estados Unidos da América (12%) e Índia (9%) [5]. O biometano produzido mundialmente possui diferentes aplicações, como para fins térmicos e injeção em redes de gás natural, sendo a aplicação como combustível veicular representando ainda uma pequena parcela (20%) [5].

Estudos envolvendo biometano concentram-se sobretudo em motores de ignição por centelha. Chandra et al. [6] compararam o uso de biometano (95% CH<sub>4</sub> em volume) com o gás natural em um motor estacionário para geração de energia elétrica, observando uma redução na energia gerada para o motor com biometano em comparação com a operação original com gás natural. Karlsson et al. [7] conduziram testes experimentais em veículos bi-fuel à gasolina e gás natural, substituindo o gás natural por biometano com 97% de CH<sub>4</sub> em volume. Os autores observaram que o uso do biometano gerou emissões inferiores aos limites impostos pela norma EURO-5. Lim et al. [8] ensaiaram experimentalmente ônibus alimentados com biometano, onde concluíram que

devido ao menor poder calorífico do biometano em comparação ao gás natural, as emissões de óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>) foram reduzidas.

Mesmo com a produção mundial de biometano crescendo e estudos indicando benefícios do uso como combustível veicular, os países da América do Sul ainda possuem desafios para alcançar níveis de produção e utilização que os coloquem entre os principais países do mundo neste tema. A América do Sul possui destaque no setor agropecuário, o que poderia impulsionar a produção de biometano a partir dos resíduos orgânicos gerados. Além disso, em muitos países do continente não há legislações e controle específicos para o descarte de lixo urbano, gerando níveis elevados de emissão de CH<sub>4</sub> na atmosfera a partir de lixos depositados em lixões sem que haja tratamento por meio de aterros sanitários.

O presente trabalho busca investigar o potencial de redução nas emissões de CO<sub>2</sub>, a partir da reação de combustão estequiométrica, para a substituição do gás natural por biometano em veículos leves e de passeio. A partir de estimativas para o consumo médio e distância anual percorrida pelos veículos, dados divulgados para a frota de veículos alimentados com gás natural em países da América do Sul serão utilizados para o cálculo das emissões de CO<sub>2</sub>. Adicionalmente, o volume de biometano necessário para os cenários avaliados será estimado, visando identificar o nível de maturidade de cada país na utilização do biometano como combustível veicular.

### 1.1. Biogás e biometano

A produção do biogás se dá por meio da digestão anaeróbica de matéria orgânica. O processo envolve uma série de processos bioquímicos, como hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese, e a composição final do biogás irá depender de diversos fatores como o substrato utilizado, temperatura, pH e tempo de retenção [9]. A Tabela 1 ilustra a composição típica do biogás para as principais matérias-primas utilizadas.

**Tabela 1.** Composição típica do biogás para diferentes matérias-primas.

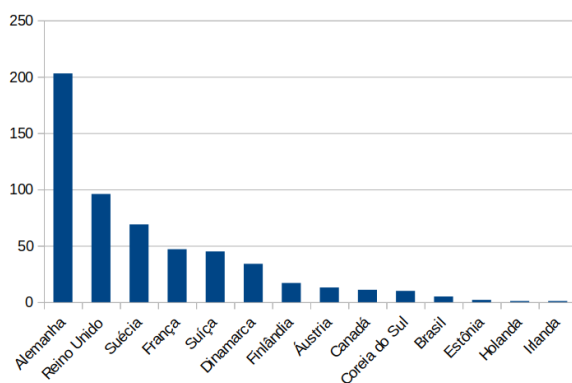
| Componente              | Lodo de esgoto | Aterro sanitário | Águas residuais |
|-------------------------|----------------|------------------|-----------------|
| CH <sub>4</sub> (% v.)  | 60-70          | 35-65            | 55-58           |
| CO <sub>2</sub> (% v.)  | 34-38          | 30-45            | 32-50           |
| H <sub>2</sub> O (% v.) | 1-7            | 1-5              | 1-5             |
| NH <sub>3</sub> (ppm)   | 50-100         | 0-5              | 0-100           |
| H <sub>2</sub> (% v.)   | Traços         | 0-5              | Traços          |
| O <sub>2</sub> (% v.)   | Traços         | 0-1              | Traços          |
| N <sub>2</sub> (% v.)   | 0-2            | 5-15             | Traços          |
| H <sub>2</sub> S (% v.) | 0-4000         | 0-100            | 0-4000          |

Fonte: [10-11].

No intuito de utilizar o biogás como combustível, é importante aumentar a concentração de  $\text{CH}_4$  para que alcance valores de poder calorífico inferior compatíveis com o gás natural. A separação dos componentes presentes no biogás se dá geralmente em duas etapas, sendo a primeira responsável por retirar componentes indesejados que apresentam menores concentrações (como o  $\text{H}_2\text{S}$ ) e posteriormente é realizada a purificação no intuito de elevar a concentração de  $\text{CH}_4$ , denominada *upgrading*. Desta forma, o gás final apresenta elevados níveis de  $\text{CH}_4$  (superiores a 90%), baixa concentração de  $\text{CO}_2$  (abaixo de 5%) e não apresenta  $\text{H}_2\text{S}$  [12]. O gás final, rico em metano é denominado biometano. A título de comparação, o poder calorífico inferior de um biogás bruto fica entre 20,7 e 27,8  $\text{MJ/m}^3$ , enquanto o biometano pode alcançar de 37,7 a 39,8  $\text{MJ/m}^3$  [13].

## 1.2. Métodos de Upgrading

Os métodos utilizados no *upgrading* do biogás são baseados em métodos conhecidos e tradicionalmente empregados na indústria para purificação do gás natural [14]. Durante a purificação, componentes indesejados do biogás, como  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{S}$ , são removidos e consequentemente a concentração de  $\text{CH}_4$  aumenta. Os principais métodos utilizados são absorção, adsorção, permeação por membranas e criogenia [15]. A Figura 1 ilustra a distribuição de plantas que realizam *upgrading* do biogás no mundo, onde é possível observar que a Alemanha é o país com maior número de instalações e o método de absorção por lavagem em água é o método mais utilizado.



**Figura 1.** Plantas de *upgrading* de biometano no mundo.  
Fonte: [16].

A absorção é a tecnologia mais empregada para o *upgrading* do biogás. É possível realizá-la por meio da absorção física, na qual os contaminantes do biogás são absorvidos por solventes em fluxos contracorrente, ou a partir da absorção química. A absorção física por lavagem em água é a tecnologia mais comum e bem desenvolvida para remover  $\text{CO}_2$  e  $\text{H}_2\text{S}$  do biogás. É uma técnica que pode ser utilizada

para diversas vazões de biogás, especialmente entre 500 e 2.000  $\text{Nm}^3/\text{h}$  [17]. Para concentrações de  $\text{H}_2\text{S}$  no biogás superiores a 2.500 ppm, é recomendado que sua remoção seja realizada antes do *upgrading* visando evitar corrosão dos componentes do sistema [14]. Na absorção por água, o  $\text{CO}_2$  e outros componentes do biogás são absorvidos na água em altas pressões (entre 6 e 10 bar) e temperaturas baixas (até 40°C). O consumo de água necessário para purificar 1.000  $\text{Nm}^3/\text{h}$  de biogás está entorno de 180 a 200  $\text{m}^3/\text{h}$ . No final, o biometano produzido pode alcançar até 99% de concentração volumétrica de  $\text{CH}_4$  [18].

Outro método empregado para *upgrading* do biogás é a adsorção, onde o  $\text{CO}_2$  adsorvido pode ser facilmente recuperado através da variação de pressão, temperatura ou aplicando vácuo. Destas três formas, a variação de pressão é a mais comum. A adsorção por variação de pressão se baseia na capacidade de adsorção de determinadas moléculas por materiais porosos aplicando altas pressões. Geralmente o processo de adsorção requer pressões entre 3 e 8 bar e temperaturas de 50 a 60 °C, enquanto a regeneração ocorre em pressões de 0,1 e 0,2 bar [13]. A remoção prévia do  $\text{H}_2\text{S}$  é necessária para este processo, pois a adsorção do  $\text{H}_2\text{S}$  ocorre de maneira irreversível [18]. O uso desta tecnologia é recomendada para as mais diversas vazões de biogás, entretanto não é ideal para vazões acima de 2.000  $\text{Nm}^3/\text{h}$  [17].

A permeação por membranas utiliza membranas semipermeáveis que permitem a separação dos gases presentes no biogás a partir de seus tamanhos relativos. Desta forma, moléculas pequenas e altamente solúveis presentes no biogás, como  $\text{H}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  e  $\text{CO}_2$  permeiam na membrana a uma taxa maior que o metano [19]. Quando o biogás é forçado através de uma membrana de permeação, duas correntes de gases são formadas, uma rica em  $\text{CH}_4$  e outra rica em  $\text{CO}_2$ .

A separação por criogenia se baseia nas diferentes temperaturas de liquefação dos componentes presentes no biogás. Em geral, utiliza baixas temperaturas (-170°C) e elevadas pressões (80 bar) [13]. O processo de separação por criogenia é realizado com a redução gradual da temperatura até que  $\text{CO}_2$  e  $\text{CH}_4$  puros sejam obtidos. Assim como na adsorção, na separação por criogenia é necessário remover previamente o  $\text{H}_2\text{S}$  e a água, visando evitar problemas como congelamento e corrosão nos trocadores de calor.

A escolha da tecnologia apropriada para a purificação do biogás envolve diversos parâmetros, como complexidade, consumo energético, durabilidade, custo, nível de pureza, vazão disponível de biogás etc. Dentre os principais métodos utilizados

comercialmente, é possível traçar um comparativo apontando benefícios e desvantagens de cada método.

- Lavagem por água (absorção): A absorção por lavagem em água é uma tecnologia simples e bem desenvolvida. Nela, é possível obter biometano com concentrações volumétricas de metano de até 98%. Entretanto, mesmo sendo considerada um processo eficiente, requer um investimento relativamente alto além de possuir custos de operação significativos. Além destes aspectos, requer um alto consumo energético sobretudo na etapa de regeneração da água [18,20].

- Adsorção: O uso da adsorção por variação de pressão permite níveis altos de pureza do biometano (95-99%). É um método que possui operação simples, investimento e custo operacional baixos [18,21]. A necessidade de remoção do  $H_2S$  e da umidade previamente aumenta os custos do processo. Entretanto, não há necessidade de custos extras com a regeneração da água ou outro solvente, ou ainda fornecimento de calor extra para a regeneração do adsorvente. O método de *upgrading* via adsorção por variação de pressão é complexo, mas utiliza equipamentos compactos que podem ser facilmente aplicados em plantas de purificação de pequena escala [14,22].

- Permeação por membranas: Requer um investimento relativamente baixo, além de utilizar equipamentos compactos e simples. Como desvantagens, requer constante substituição das membranas além da necessidade de remoção prévia do  $H_2S$ .

- Criogenia: É um método que vem crescendo nos últimos anos, e possui como principal vantagem a produção de biometano com elevados níveis de  $CH_4$  (superiores a 97%) sem que haja excessivas perdas de metano ao longo do processo. A principal desvantagem está relacionada com a complexidade, além de possuir custos maiores [18,23].

Em resumo, a Tabela 2 ilustra a concentração típica de  $CH_4$  no biometano em cada um dos principais métodos de *upgrading*, bem como o consumo energético estimado para cada tecnologia.

### 1.3. Cenário atual do biometano na América do Sul

Na Argentina não foram encontradas aplicações de biometano, seja para injeção em gasodutos ou seja para utilização como combustível veicular. Em levantamento realizado pelo Instituto nacional de Tecnologia em 2016, foram apontadas 105 plantas de biodigestão espalhadas pelo país, das quais 62 foram classificadas com porte grande ou médio. Destas, 44,3% utilizam o biogás produzido para fins térmicos

e 12,0% para geração de eletricidade [24]. Legislações e investimentos governamentais recentes podem impulsionar a produção e uso de biometano na Argentina.

**Tabela 2.** Principais métodos de *upgrading* do biogás.

| Método                           | Concentração final de $CH_4$ (% v.) | Consumo energético (kWh/Nm <sup>3</sup> ) |
|----------------------------------|-------------------------------------|---|
| Absorção por água                | 95-98%                              | 0,2-0,33                                  |
| Adsorção por variação de pressão | 96-98%                              | 0,2-0,34                                  |
| Permeação por membranas          | 90-99%                              | 0,2-0,4                                   |
| Criogenia                        | 99%                                 | 0,18-0,25                                 |

Fonte: [13].

Biodigestores instalados na Bolívia concentram-se em pequenas instalações, escolas e instituições de ensino [25]. Não há registros de produção de biometano no país. Na Bolívia há grande produção de gás natural e outros combustíveis fósseis, além do incentivo fiscal para estes combustíveis.

O Brasil é o país da América do Sul que conta com maior desenvolvimento no setor de biometano. Atualmente seis plantas estão autorizadas a comercializar biometano no Brasil, com capacidade de produção estimada em 417.112 Nm<sup>3</sup>/dia [26]. Há novas plantas de produção de biometano em fase de construção e autorização, o que pode gerar uma produção total de biometano de 2,2 milhões de Nm<sup>3</sup>/dia [27].

O Chile conta com legislações que abordam energias renováveis desde o início dos anos 2000, além de contar com interesse de empresas em implementar o biometano no país. Atualmente, há registro de uma planta que produz biometano e o injeta na rede de gás natural. Esta é a Planta de Biogás La Farfana, inaugurada em 2008 e com produção estimada em 4.113,5 m<sup>3</sup>/h [28].

Na Colômbia há um crescente interesse no fomento de energias renováveis. O biogás é utilizado no país para geração de energia elétrica e térmica, mas a aplicação do biometano comercialmente ainda não foi desenvolvida.

O Equador possui registros da utilização do biogás, entretanto a produção e comercialização de biometano no país ainda não foi desenvolvida.

A Guiana conta com a falta de incentivos para o fomento de energias renováveis, pesando contra a exploração do biometano no país.

No Paraguai não há registros de produção e comercialização de biometano. O país poderia se beneficiar do desenvolvimento realizado na Usina de Itaipu, na qual a parte brasileira produz biometano e o utiliza na frota de veículos interna [29].

O Peru ainda não apresenta informações de comercialização de biometano. Entretanto, estudos recentes da utilização de biometano em máquinas agrícolas no país fizeram o governo anunciar futuros investimentos no fomento do biometano para fins de mobilidade.

Suriname é outro país da América do Sul que não possui registros de produção e comercialização de biometano. Estima-se que o uso de biometano no país pode suprir totalmente o uso de gás natural [30].

O governo do Uruguai estuda meios de impulsionar o uso de energias renováveis não convencionais, como o biometano. Entretanto, atualmente não há legislações específicas para o desenvolvimento do biometano, forçando a biodigestão a competir com fontes energéticas convencionais. Mesmo com o uso de biogás para geração de energia elétrica e térmica, não foram encontradas informações sobre produção e comercialização de biometano no país.

Na Venezuela é possível encontrar registros de utilização de biogás para fins energéticos. Entretanto, devido ao fato de o país ser uma das maiores reservas de gás natural do mundo, o biometano não se torna competitivo sem que haja incentivos específicos. Desta forma, não há registros de comercialização de biometano na Venezuela.

## 2. Metodologia

A metodologia utilizada no presente trabalho se baseia no estudo realizado por Coronado et. al [31], no qual as emissões de CO<sub>2</sub> foram avaliadas para os principais combustíveis utilizados no mercado brasileiro a partir das reações de combustão estequiométrica. Entretanto, no presente trabalho o combustível renovável avaliado é o biometano em países da América do Sul. Desta forma, a análise consiste na comparação do biometano com o gás natural veicular, na qual a média de CO<sub>2</sub> emitido com gás natural ou com biometano é estimada a partir da combustão estequiométrica. A partir dos dados disponíveis acerca da frota circulante alimentada à gás natural em países selecionados da América do Sul e das emissões calculadas para cada combustível, será realizada uma estimativa para emissões de CO<sub>2</sub> da frota total com gás natural bem como para cinco cenários de substituição por biometano, a saber: 1%, 5%, 10%, 15% e 20%.

### 2.1. Emissões de CO<sub>2</sub> de acordo com o combustível

Emissões de CO<sub>2</sub> são um parâmetro importante na avaliação de motores de combustão interna, visto que muitas legislações recentes focam na redução e restrição deste poluente a curto e médio prazo. Além disto, o uso de combustíveis renováveis gera benefícios a partir da reutilização de rejeitos.

O biometano possui composição variável. Desta forma, foi utilizada a composição química do biometano comercializado na região sudeste do Brasil, apresentada na Tabela 3. A combustão estequiométrica do biometano apresentado na Tabela 3, está representada na Equação 1.

**Tabela 3.** Composição do biometano.

| Gás             | Concentração (% v.) |
|-----------------|---------------------|
| CH <sub>4</sub> | 95,67               |
| N <sub>2</sub>  | 3,85                |
| O <sub>2</sub>  | 0,48                |

Fonte: Elaboração própria.

$$0,9567 CH_4 + 0,0385 N_2 + 0,0048 O_2 + 1,9086 (O_2 + 3,76 N_2) \rightarrow 0,9567 CO_2 + 1,9134 H_2O + 7,214836 N_2 \quad (1)$$

Assim, por meio da Equação 1 é possível estimar que sejam emitidos 42,09 g de CO<sub>2</sub> para cada 16,54 g de biometano. Ou seja, levando em consideração sua massa específica (0,677 kg/m<sup>3</sup>), a combustão estequiométrica do biometano emite 1,72 kg de CO<sub>2</sub> por m<sup>3</sup> de biometano.

O gás natural veicular é outro combustível que possui composição variável. Desta forma, foi utilizado como referência para os cálculos o gás comercializado na região sul de Minas Gerais, no Brasil. A composição típica do gás natural veicular está apresentada na Tabela 4, cuja densidade a 20°C e 1 atm é 0,754 kg/m<sup>3</sup>.

**Tabela 4.** Composição do gás natural veicular.

| Gás                            | Concentração (% v.) |
|--------------------------------|---------------------|
| CH <sub>4</sub>                | 88,5                |
| C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>  | 6,2                 |
| C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>  | 2,2                 |
| CO <sub>2</sub>                | 1,8                 |
| C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> | 0,8                 |
| N <sub>2</sub>                 | 0,5                 |

Fonte: Elaboração própria.

$$0,885 CH_4 + 0,062 C_2H_6 + 0,022 C_3H_8 + 0,018 CO_2 + 0,008 C_4H_{10} + 0,005 N_2 + 2,149 (O_2 + 3,76 N_2) \rightarrow 1,125 CO_2 + 2,084 H_2O + 8,08524 N_2 \quad (2)$$

A combustão estequiométrica e completa deste gás, representada pela Equação 2, gera 49,5 g de CO<sub>2</sub> para cada 18,38 g do combustível. Assim, considerando a

densidade do gás natural, a emissão é de 2,03 kg CO<sub>2</sub> por m<sup>3</sup>.

## 2.2. Frota veicular à gás natural

A frota veicular em cada um dos países foi considerada de acordo com os dados mais recentes divulgados pelos órgãos competentes. A Tabela 5 apresenta estes dados com base na frota de veículos alimentados com gás natural. É importante destacar que foram encontradas informações sobre a frota veicular circulante em relação ao combustível utilizado apenas na Argentina, Brasil, Chile e Equador.

**Tabela 5.** Frota veicular à gás natural.

| País      | Veículos à Gás Natural | Fonte |
|-----------|------------------------|-------|
| Argentina | 1.800.000              | [32]  |
| Brasil    | 140.000                | [33]  |
| Chile     | 5.510                  | [34]  |
| Equador   | 5.790                  | [35]  |

Fonte: Elaboração própria.

A partir das informações da Tabela 5, juntamente com a estimativa realizada de emissão de CO<sub>2</sub> baseada na Equação 2, foi realizada uma estimativa de emissão total para a frota veicular movida a gás natural nos países selecionados da América do Sul. Para tal estimativa, foi considerado que um veículo alimentado à gás natural possui um consumo médio de 13 km/m<sup>3</sup> [36]. Devido ao elevado nível de pureza do biometano considerado neste trabalho, foi considerado um consumo igual ao do gás natural, pois o biometano pode ser um substituto direto ao gás natural veicular. A distância anual média percorrida por veículos leves e de passeio foi considerada como 20.000 km [31]. A Tabela 6 apresenta as emissões estimadas.

**Tabela 6.** Emissões estimadas de CO<sub>2</sub> por país utilizando gás natural veicular.

| País      | Veículos à gás natural | ton CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> por ano |
|-----------|------------------------|---|
| Argentina | 1.800.000              | 5,621                                       |
| Brasil    | 140.000                | 0,437                                       |
| Chile     | 5.510                  | 0,017                                       |
| Equador   | 5.790                  | 0,018                                       |

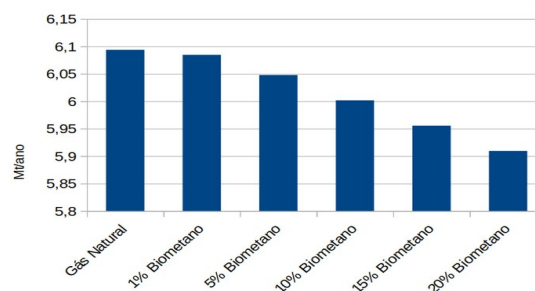
Fonte: Elaboração própria.

## 3. Resultados e discussões

Baseado nas Equações 1 e 2, na estimativa da distância percorrida por ano (20.000 km) e no consumo médio (13 km/m<sup>3</sup>), estima-se que um veículo alimentado com gás natural veicular emita 3,12 ton<sub>CO2</sub>/ano, enquanto um veículo alimentado com o biometano da Tabela 3 emite 2,65 ton<sub>CO2</sub>/ano. Desta forma, a substituição direta de um combustível pelo outro tem o potencial de reduzir as emissões de CO<sub>2</sub>

em até 15,06%. Destaca-se ainda que tal substituição reduziria a dependência de combustíveis fósseis, além de reforçar o uso de um combustível renovável.

A partir das informações da Tabela 5 acerca da frota veicular alimentada com gás natural veicular, diferentes cenários de substituição do gás natural pelo biometano foram avaliadas: 1%, 5%, 10%, 15% e 20%. A Figura 2 apresenta as emissões equivalentes de CO<sub>2</sub> para os diferentes cenários avaliados.



**Figura 2.** Emissões de CO<sub>2</sub> por cenário de substituição.

Fonte: Autoria própria

Como é possível observar pela Figura 2, a emissão total de CO<sub>2</sub> a partir da frota veicular movida a gás natural nos quatro países da América do Sul representados na Tabela 5, corresponde à 6,09 milhões de toneladas por ano. Devido à menor emissão de CO<sub>2</sub> a partir do biometano, como foi evidenciado pelas Equações 1 e 2, o uso do mesmo no lugar do gás natural pode proporcionar reduções neste poluente. Por exemplo, no cenário em que 1% do gás natural utilizado como combustível é substituído por biometano, é possível reduzir anualmente 9.230 toneladas de CO<sub>2</sub> emitidos à atmosfera. Reduções maiores são possíveis para maiores substituições. Entretanto, como na América do Sul o biometano ainda não é totalmente difundido, a taxa de substituição foi limitada à 20%, sendo este um valor alcançável. Para 20% da frota utilizando biometano, a redução nas emissões de CO<sub>2</sub> podem alcançar 184.593 ton/ano. Para este último cenário, a emissão total dos veículos a gás natural e biometano juntos representariam uma emissão anual de CO<sub>2</sub> de 5,90 toneladas.

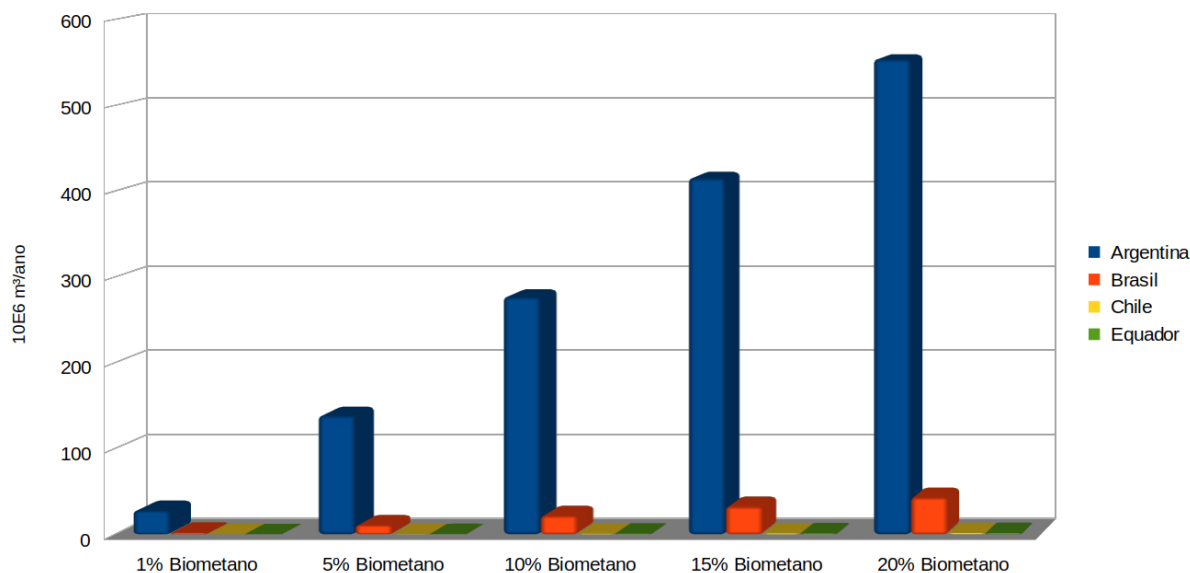
Estes resultados estão associados diretamente com a menor concentração de carbono presente no biometano, visto que o mesmo apresenta apenas CH<sub>4</sub> como hidrocarboneto, sem que haja a presença de CO<sub>2</sub> em sua composição. Já o gás natural veicular apresenta traços de hidrocarbonetos com maior teor de carbono, além de apresentar traços de CO<sub>2</sub> em sua composição.

Dado os resultados apresentados para os cinco cenários de substituição do gás natural por biometano



em veículos leves e de passeio nos países avaliados, torna-se importante analisar o impacto de tais cenários na produção de biometano necessária. A Figura 3 contém a projeção do biometano necessário para alimentar os veículos.

No Chile o volume anual de biometano necessário fica em torno de 0,84 e 1,695 milhões de m<sup>3</sup>/ano. Para o Chile, a produção atual de biometano registrada no país seria capaz de suprir até 15% de substituição do gás natural em veículos leves, permitindo a redução de 390,93 ton<sub>CO2</sub>/ano.



**Figura 3.** Volume necessário de biometano por país. Fonte: Autoria própria.

Devido ao maior número de veículos movidos à gás natural, a Argentina é o país com maior necessidade de produção de biometano para fins de mobilidade em veículos leves e de passeio. Em um cenário de 1% de substituição, seria necessário produzir 27,69 milhões de m<sup>3</sup>/ano de biometano. A produção necessária aumenta à medida que a substituição aumenta, sendo 138,46 milhões de m<sup>3</sup>/ano para 5% de substituição, 276,92 milhões de m<sup>3</sup>/ano para 10% de substituição, 415,38 milhões de m<sup>3</sup>/ano para 15% de substituição e 553,85 milhões de m<sup>3</sup>/ano para 20% de substituição. Entretanto, na Argentina não há dados divulgados de produção e comercialização do biometano, tornando necessário um investimento rápido para que seja possível implementar o biometano como combustível veicular no país.

Brasil é o segundo país na América do Sul em número de veículos alimentados com gás natural atualmente. Desta forma, os cenários de 1%, 5%, 10%, 15% e 20% de substituição do gás natural representariam uma produção necessária de biometano de 2,15, 10,78, 21,54, 32,31 e 43,08 milhões de m<sup>3</sup>/ano. Atualmente o Brasil é o maior produtor de biometano na América do Sul, cuja capacidade de produção é equivalente a 152,25 milhões de m<sup>3</sup>/ano. Desta forma, o país poderia substituir até 20% da frota de veículos leves movidos à gás natural, resultando em uma redução nas emissões de CO<sub>2</sub> de até 13.244 ton<sub>CO2</sub>/ano.

Para o Equador, o volume requerido de biometano para os cenários de substituição avaliados fica entre 0,089 e 1,782 milhões de m<sup>3</sup>/ano. Atualmente não há produção e comercialização de biometano registrado no país. Entretanto, a mesma avaliação realizada para o Chile pode ser feita no Equador. Uma planta de biometano do porte da planta registrada no Chile poderia suprir 15% de substituição, com potencial de reduzir as emissões de CO<sub>2</sub> em 410,80 ton<sub>CO2</sub>/ano.

#### 4. Conclusões

O uso do biometano como combustível no lugar do gás natural pode proporcionar uma redução significativa das emissões de CO<sub>2</sub>. A substituição direta pode reduzir em até 15,06% das emissões de CO<sub>2</sub>, considerando a combustão completa e estequiométrica. Desta forma, o biometano se torna um combustível promissor para a descarbonização do setor de transportes dado sua menor emissão de CO<sub>2</sub> em comparação com o gás natural, além de ser renovável.

Considerando Argentina, Brasil, Chile e Equador, países onde é possível encontrar dados sobre a frota veicular circulante com gás natural, um cenário de 20% de substituição do gás natural por biometano pode reduzir as emissões de CO<sub>2</sub> em até 184.593 ton/ano. Devido ao volume produzido atualmente, o cenário mais conservador com 1% de substituição se

torna mais factível, onde a redução nas emissões de CO<sub>2</sub> é de 9.230 ton/ano.

Brasil e Chile possuem comercialização de biometano. No Brasil, maior produtor de biometano da América do Sul, o volume atualmente gerado seria capaz de suprir 20% da frota de veículos leves e de passeio à gás natural, gerando uma redução nas emissões de CO<sub>2</sub> de até 13.244 ton/ano. Caso a produção atual de biometano no Chile fosse utilizada como combustível veicular, seria possível substituir 15% da frota circulante com gás natural, representando uma redução nas emissões de CO<sub>2</sub> de 390,93 ton/ano.

Nos países avaliados, a Argentina é a que possui maior potencial de redução devido à maior frota veicular alimentada com gás natural. Entretanto, no país não foram encontradas informações acerca da produção e comercialização de biometano, tornando necessários investimentos no fomento do biometano em solo argentino. No Equador não há informações acerca da produção e comercialização de biometano. Entretanto, números similares aos do Chile poderiam ser alcançados.

Desta forma, o uso do biometano em substituição ao gás natural como combustível em veículos leves e de passeio poderia ser uma alternativa para a redução nas emissões de CO<sub>2</sub> na América do Sul. Entretanto, barreiras no fomento do biometano no continente ainda devem ser superadas de forma a aumentar a produção e consequentemente suprir as demandas veiculares atuais.

### Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Desenvolvimento da Pesquisa – FUNDEP pelo apoio à pesquisa por meio do projeto de pesquisa Rota2030/Linha V (27192\*62). Também à FAPEMIG (Projetos: Proc. APQ-01763-23 e RED-00090-21) e CNPq: Proc. N° 308567/2023-4) e Processo CNPq: 442662/2023-8.

### Referências

[1] H. Guo, S. Zhou, M. Shreka, Y. Feng. "Effect of pre-combustion chamber nozzle parameters on the performance of a marine 2-stroke dual fuel engine". *Processes*, vol. 7, n.º 12, pp. 876. 2019.

[2] Y. Li, F. Yang, X. Linxun, J. Liu, J. Wang, X. Duan. "Influences of the control parameters and spark plug configurations on the performance of a natural gas spark-ignition engine". *Fuel*, vol. 324, pp. 124728. 2022.

[3] E. Hu, Z. Huang, B. Liu, J. Zheng, X. Gu. "Experimental study on combustion characteristics of

a spark-ignition engine fueled with natural gas-hydrogen blends combining with egr". *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 34, n.º 2, pp. 1035–1044. 2009.

[4] A.A. Yontar, Y. Dogu. "Effects of equivalence ratio and cng addition on engine performance and emissions in a dual sequential ignition engine". *International Journal of Engine Research*, vol. 21, n.º 6, pp. 1067–1082. 2019.

[5] IEA, Renewables 2023, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/renewables-2023>, Licence: CC BY 4.0 (2024).

[6] R. Chandra, V. Vijay, P. Subbarao, T. Khura. "Performance evaluation of a constant speed ic engine on cng, methane enriched biogas and biogas". *Applied Energy*, vol. 88, n.º 11, pp. 3969–3977. 2011.

[7] H. Karlsson, J. Gasste, P. Asman. "Regulated and non-regulated emissions from euro 4 alternative fuel vehicles". *SAE technical papers on CD-ROM/SAE technical paper series*. 2008.

[8] C. Lim, D. Kim, C. Song, J. Kim, J. Han, J.-S. Cha. "Performance and emission characteristics of a vehicle fueled with enriched biogas and natural gases". *Applied Energy*, vol. 139, pp. 17–29. 2015.

[9] R. Kadam, N.L. Panwar. "Recent advancement in biogas enrichment and its applications". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 73, pp. 892–903. 2017.

[10] Z. Zhang, W. Zhang, E. Lichtfouse. "Membranes for environmental applications". *Environmental chemistry for a sustainable world*. 2020.

[11] J. Gao, Y. Wang, Y. Ping, D. Hu, G. Xu, F. Gu, F. Su. "A thermodynamic analysis of methanation reactions of carbon oxides for the production of synthetic natural gas". *RSC Advances*, vol. 2, n.º 6, pp. 2358. 2012.

[12] A.I. Adnan, M.Y. Ong, S. Nomanbhay, K.W. Chew, P.L. Show. "Technologies for biogas upgrading to biomethane: a review". *Bioengineering*, vol. 6, n.º 4, pp. 92. 2019.

[13] P. Gkotsis, P. Kougias, M. Mitrakas, A. Zouboulis. "Biogas upgrading technologies e Recent advances in membrane-based processes". *International Journal of Hydrogen Energy*, vol.48, pp. 3965–3993. 2022.

[14] R. Kapoor, P. Ghosh, M. Kumar, V. Vijay. "Evaluation of biogas upgrading technologies and future perspectives: a review". *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 26, n.º 12, pp. 11631–11661. 2019.

[15] I. Angelidaki, L. Xie, G. Luo, Y. Zhang, H. Oechsner, A. Lemmer, R. Munoz, P.G. Kougias. "Biogas upgrading: current and emerging technologies". *Biofuels: Alternative Feedstocks and Conversion Processes for the Production of Liquid and Gaseous Biofuels*, pp. 817–843, 2019.

[16] IEA. "New – IEA Bioenergy Task 37 updated list of biogas upgrading plants – Bioenergy". Disponível



em:

<<https://www.ieabioenergy.com/blog/publications/new-iea-bioenergy-task-37-updated-list-of-biogas-upgrading-plants/>>. Acesso em: 10 mai. 2024.

[17] J. Niesner, D. Jecha, P. Stehlik. "Biogas upgrading technologies: state of art review in European region". Chemical Engineering Transactions, vol. 35, pp. 517–522. 2013.

[18] U.I. Khan, D.O.M. Hafiz, H. Hashim, T. Matsuura, A.F. Ismail, M. Rezaei-DashtArzhandi, A.I. Wan. "Biogas as a renewable energy fuel - a review of biogas upgrading, utilisation and storage". Energy Conversion and Management, vol. 150, pp. 277–294. 2017.

[19] M. Scholz, T. Melin, M. Wessling. "Transforming biogas into biomethane using membrane technology". Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 17, pp. 199–212. 2013.

[20] V. Paolini, P. Tratzi, M. Torre, L. Tomassetti, M. Segreto, F. Petracchini. "Water scrubbing for biogas upgrading: developments and innovations". Emerging Technologies and Biological Systems for Biogas Upgrading, pp. 57–71. 2021.

[21] R. Augelletti, M. Conti, M.C. Annesini. "Pressure swing adsorption for biogas upgrading. A new process configuration for the separation of biomethane and carbon dioxide". Journal of Cleaner Production, vol. 140, pp. 1390–1398. 2017.

[22] A. Carranza-Abaid, R.R. Wanderley, H.K. Knuuila, J.P. Jakobsen. "Analysis and selection of optimal solvent-based technologies for biogas upgrading". Fuel, vol. 303, pp. 121327. 2021.

[23] A. Naquash, M.A. Qyyum, J. Haider, A. Bokhari, H. Lim, M. Lee. "State-of-the-art assessment of cryogenic technologies for biogas upgrading: energy, economic, and environmental perspectives". Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 154, pp. 111826. 2022.

[24] G.A.H. de Biocombustíveis do Mercosul, Relatório de biogás e biometano do mercosul / gahb - grupo ad hoc de biocombustíveis do mercosul - vol. 1, n. 1 (2017) cibogás: Foz do iguaçu, 2017. issn 2526-9534.

[25] J. Martí-Herrero, M. Chipana, C. Cuevas, G. Paco, V. Serrano, B. Zymala, K. Heising, J. Sologuren, A. Gamarra. "Low cost tubular digesters as appropriate technology for widespread application: Results and lessons learned from bolivia". Renewable Energy, vol. 71, pp. 156–165. 2014.

[26] ANP. "Painel dinâmico de produtores de biometano". Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br>>. Acesso em: 29 mai. 2024.

[27] A. Ramalho. "Brasil será um dos 5 maiores produtores de biometano do mundo, prevê IEA". Disponível em: <<https://epbr.com.br/brasil-sera-um-dos-5-maiores-produtores-de-biometano-do-mundo-preve-iea/>>. Acesso em: 10 jun. 2024.

[28] M. de Energía. "Fecha de actualización: Diciembre de 2017". versión 2.

[29] Itaipu. "Itaipu binacional". Disponível em: <<https://www.itaipu.gov.br/>>. Acesso em: 15 jun. 2024.

[30] P. Marconi, L. Rosa. "Role of biomethane to offset natural gas". Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 187, pp. 113697. 2023.

[31] C.R. Coronado, J.A. Carvalho, J.J. Silveira. "Biodiesel CO<sub>2</sub> emissions: A comparison with the main fuels in the Brazilian market". Fuel Processing Technology, vol. 90, pp. 204–211. 2009.

[32] AFAC. "Flota vehicular circulante em Argentina 2022". Disponível em: <<https://cdn.motor1.com/pdf-files/afac-flota-circulante-2022.pdf>>. Acesso em: 03 mar. 2024.

[33] SINDIPECAS. "Anuário 2023 do Sindipeças". Disponível em: <[https://static.poder360.com.br/2023/05/RelatorioFrotaCirculante\\_2023.pdf](https://static.poder360.com.br/2023/05/RelatorioFrotaCirculante_2023.pdf)>. Acesso em: 03 mar. 2024.

[34] INE. "Permisos de circulación" Disponível em: <<https://www.ine.gob.cl/estadisticas/economia/transporte-y-comunicaciones/permiso-de-circulacion>>. Acesso em: 05 mar. 2024.

[35] AEADE. "Sector automotor em cifras". Disponível em: <<https://www.aeade.net/wp-content/uploads/2024/02/1.-Sector-en-Cifras-Resumen-Enero-2024.pdf>>. Acesso em: 05 mar. 2024.

[36] GASMIG. Disponível em: <<https://gasmig.com.br/>>. Acesso em: 13 mai. 2024.